

## دراسة تحليلية من أجل تحديد درجة حرارة جدار يحتوي أو لا يحتوي مادة متغيرة الطور (PCM)

الدكتورة مها احمد\*

(تاريخ الإيداع 24 / 11 / 2014. قُبِلَ للنشر في 21 / 4 / 2015)

### □ ملخص □

يُعد من الهام؛ عند ارتفاع درجة حرارة السطح الخارجي للجدار؛ تقدير سماكته التي لا تسمح لدرجة حرارة سطحه الداخلي من تجاوز قيمة حدية. سنقوم في هذا البحث؛ من خلال دراسة تحليلية؛ بدراسة الحالة التي ترتفع فيها درجة حرارة السطح الخارجي بشكل خطي مع الزمن، وتحديد الفترة الزمنية اللازمة حتى تبلغ درجة الحرارة قيمة معينة عند سماكة محددة من الجدار. سندرس حالتين للجدار، حيث يكون في الحالة الأولى مكوناً من مادة متجانسة (مثلاً بيتون)، أما في الحالة الثانية فيكون مكوناً من البيتون ومن مادة متغيرة الطور التي سيتم اختيار درجة حرارة تغيير طورها تبعاً لدرجة الحرارة المرغوبة.

تبيّن النتائج التي تم الحصول عليها أنه يوجد فرق زمني مهم بين الحالتين من أجل بلوغ درجة الحرارة المطلوبة.

**الكلمات المفتاحية:** مادة متغيرة الطور (PCM)، درجة حرارة الجدار، طريقة تحليلية.

\* أستاذ مساعد - قسم القوى الميكانيكية . كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية

## Analytical method for determining the temperature of a wall with or without a Phase Change Material (PCM)

Dr. Maha Ahmad\*

(Received 24 / 11 / 2014. Accepted 21 / 4 / 2015)

### □ ABSTRACT □

When the temperature of the external surface of a wall increases, it is important to predict what the thickness of the wall will be so that the internal surface of the wall does not exceed a limit value. We will study, by an analytical method, the case in which the external surface temperature is linearly varying with time in order to determine the time for which the temperature does not exceed a predetermined limit value at a given depth from the surface. Two cases will be considered: the first one is for a wall made of a homogeneous material (e.g. concrete) and the second one is for a wall made up of concrete and phase-changing material whose melting temperature will be selected according to the desired temperature. The results obtained show that a significant delay to reach this temperature can be obtained between the two cases.

**Key words:** Phase Change Material (PCM), wall Temperature, analytical method

---

\*Assistant professor, Departement of Mecanical power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

## مقدمة:

يوجد العديد من الأبحاث التي أُنجزت من أجل تعيين تأثير استخدام المواد متغيرة الطور (PCM) على درجة الحرارة الداخلية للمبنى [1]. ويُعتبر تعيين سماكة المادة متغيرة الطور؛ التي سيتم احتواؤها ضمن هيكل البناء والتي يجب أن تأخذ في الحسبان أنّ درجة الحرارة الخارجية ليست ثابتة؛ من المشاكل التي يتوجب إيجاد حل لها، حيث إنّ درجة حرارة السطح الداخلي للجدار يجب أن تكون ذات قيمة مقبولة عندما ترتفع درجة حرارة سطحه الخارجي. يسمح استخدام المادة متغيرة الطور بتخزين الطاقة الحرارية عند درجة حرارة توافق درجة حرارة تغير الطور. كما يعمل على إبطاء عملية ارتفاع درجة الحرارة.

## أهمية البحث وأهدافه:

من المعروف أنّ استخدام المواد متغيرة الطور (PCM) في عمليات التدفئة/التكييف الفعالة والسليمة يُعد من أكثر الطرق فعالية في تخزين الطاقة الحرارية، حيث يساعد استخدام المواد متغيرة الطور مع مواد البناء في تخزين الطاقة الحرارية ضمن حجم أصغر للجدار، بالإضافة إلى تحقيق الشعور بالارتياح الحراري والحدّ من استخدام الطرق الفعالة في عمليات التدفئة والتكييف.

سنقوم في هذا البحث؛ بواسطة طريقة تحليلية؛ بدراسة كيفية تغير درجة الحرارة داخل جدار تتغير درجة حرارة سطحه الخارجي بشكل خطي مع الزمن، ودراسة التأخر الزمني اللازم حتى تبلغ درجة الحرارة قيمة معينة عند سماكة محددة من الجدار الحاوي على PCM مقارنة مع جدار لا يحوي PCM. هذا يساعد في تحديد سماكة الجدار التي تمنع درجة حرارة سطحه الداخلي من تجاوز قيمة حديّة عند ارتفاع درجة حرارة سطحه الخارجي بشكل خطي مع الزمن.

## طرائق البحث ومواده:

حتى نتمكن من إجراء الحساب التحليلي، سنفترض أنّ الجدار نصف لانهائي. تسمح لنا هذه الفرضية بمعرفة كيفية تغير درجة الحرارة داخل الجدار. ونلفت هنا إلى أنه بحدّ علمنا لم تتمّ أبداً معالجة هذه المشكلة تحليلياً. سنقوم فيما بعد بدراسة جسم صلب مكون من مادة متغيرة الطور تتغير درجة حرارة سطحه بشكل خطي مع الزمن. أيضاً لم يتمّ فيما سبق معالجة هذه المشكلة تحليلياً. يمكن أن يكون الجسم الصلب مكوناً فقط من مادة متغيرة الطور محتواة ضمن هيكل معين بحيث لا يمكن أن تسيل عندما تكون بالطور السائل. وهذه هي حالة المادة متغيرة الطور المعبأة ضمن ميكروكبسولات أو ضمن قالب مسامي. ويتوجب في هذه الحالة تعيين خواص المواد المكافئة وكذلك بنيتها.

في الجزء الأخير من الدراسة، سنعد أنّ المادة متغيرة الطور توجد خلف مادة صلبة (بيتون على سبيل المثال) تقوم بحصرها. لقد قام فيما سبق [2] Khalifa et Abbas بدراسة الحالة التي يتكون بها الجدار من بيتون يلاصقه مادة متغيرة الطور حيث درجة حرارة السطح ثابتة، بينما في حالتنا فنحن نقترح أنّ درجة حرارة السطح الفاصل بين البيتون/ PCM تتغير خطياً، ومن أجل حلّ هذه المشكلة نحافظ على فرضيتنا بأنّ الجدار عبارة عن جسم نصف لانهائي.

## النتائج والمناقشة:

## دراسة تغير درجة الحرارة داخل جدار مصنوع من البيتون تحليلياً

قمنا بإجراء الحسابات الأولية من أجل جدار اعتبرناه نصف لانهائي وبأنه مصنوع من مادة واحدة متجانسة،

حيث الشروط الحدية عند السطح ( $x = 0$ ) تمثل تغير درجة الحرارة بشكل خطي كما يلي:

$$T(0, t) = bt + T_i \quad (1)$$

حيث،  $T_i$  هي درجة الحرارة الابتدائية.

## تغير درجة الحرارة

إن درجة الحرارة  $T(x, t)$  داخل الجسم الصلب هي عبارة عن حل للمعادلة التفاضلية أحادية البعد من دون مصدر

حراري داخلي:

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

حيث  $a$ : النفاذية الحرارية. والشروط الحدية هي:

$$t = 0, \quad T(x, 0) = T_0 \quad (3)$$

$$t > 0, \quad T(x, t) = bt + T_i \quad (4)$$

نقوم بإجراء تحويل لابلاس للمعادلة التفاضلية الجزئية (1) فنحصل على:

$$\int_0^{+\infty} \frac{\partial T}{\partial t} e^{-pt} dt = a \int_0^{+\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} e^{-pt} dt \quad (5)$$

بتعويض :

$$\bar{T} = L(T) = \int_0^{+\infty} T(x, t) e^{-pt} dt \quad (6)$$

تصبح المعادلة المحولة كما يلي:

$$\frac{d^2 \bar{T}}{dx^2} = \frac{1}{a} [-T(x, 0) + p\bar{T}] = \frac{1}{a} [-T_0 + p\bar{T}] \quad (7)$$

ونحصل على المعادلة التفاضلية التالية:

$$\frac{d^2 \bar{T}}{dx^2} = -\frac{p}{a} \bar{T} = -\frac{T_0}{a} \quad (8)$$

والحل العام لها هو:

$$\bar{T} = Ae^{-kx} + \frac{T_0}{p}; \quad k^2 = \frac{p}{a} \quad (9)$$

حيث يُحسب الثابت  $A$  بأخذ الشروط الحدية (3) بعين الاعتبار، فمن أجل  $x=0$  لدينا إكثانين لـ  $\bar{T}(0)$

هما:

$$\bar{T}(0) = A + \frac{T_0}{p} \quad (10)$$

و  $\bar{T}(0) = \int_0^{+\infty} (bt + T_i) e^{-pt} dt$  التي يمكن كتابتها كما يلي:

$$\bar{T}(0) = b \int_0^{+\infty} t e^{-pt} dt + T_i \int_0^{+\infty} e^{-pt} dt$$

نحصل بالمكاملة بالتجزئة على:

$$\begin{aligned} \bar{T}(0) &= b \left[ t \cdot \frac{e^{-pt}}{-p} \right]_0^{+\infty} - b \int_0^{+\infty} \frac{e^{-pt}}{-p} dt + T_i \int_0^{+\infty} e^{-pt} dt \\ \bar{T}(0) &= \frac{b}{p} \int_0^{+\infty} e^{-pt} dt + T_i \int_0^{+\infty} e^{-pt} dt = \frac{b}{p^2} + \frac{T_i}{p} \end{aligned} \quad (11)$$

بمقارنة المعادلتين (10) و (11) واللتين تمثلان الإمكانيتان المحتملتان لـ  $\bar{T}(0)$  نجد:

$$\bar{T}(0) = A + \frac{T_0}{p} = \frac{b}{p^2} + \frac{T_i}{p} \Rightarrow A = \frac{b}{p^2} + \frac{T_i - T_0}{p}$$

والحل هو:

$$\bar{T} = \left( \frac{b}{p^2} + \frac{T_i - T_0}{p} \right) e^{-kx} + \frac{T_0}{p}$$

ويكون تحويل لابلاس العكسي للتابعين  $\frac{e^{-kx}}{p}$  و  $\frac{e^{-kx}}{p^2}$  هو:

$$L^{-1} \left( \frac{e^{-kx}}{p^2} \right) = \left( t + \frac{x^2}{2a} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - x \left( \frac{t}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{x^2}{4at} \right)$$

و:

$$L^{-1} \left( \frac{e^{-kx}}{p} \right) = \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right)$$

و تُعطى درجة الحرارة  $T(x,t)$  بالعلاقة:

$$T(x,t) = b \left[ \left( t + \frac{x^2}{2a} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - x \left( \frac{t}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{x^2}{4at} \right) \right] + (T_i - T_0) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) + T_0 \quad (12)$$

تصبح العلاقة (12) عندما  $T_i = T_0$  كما يلي:

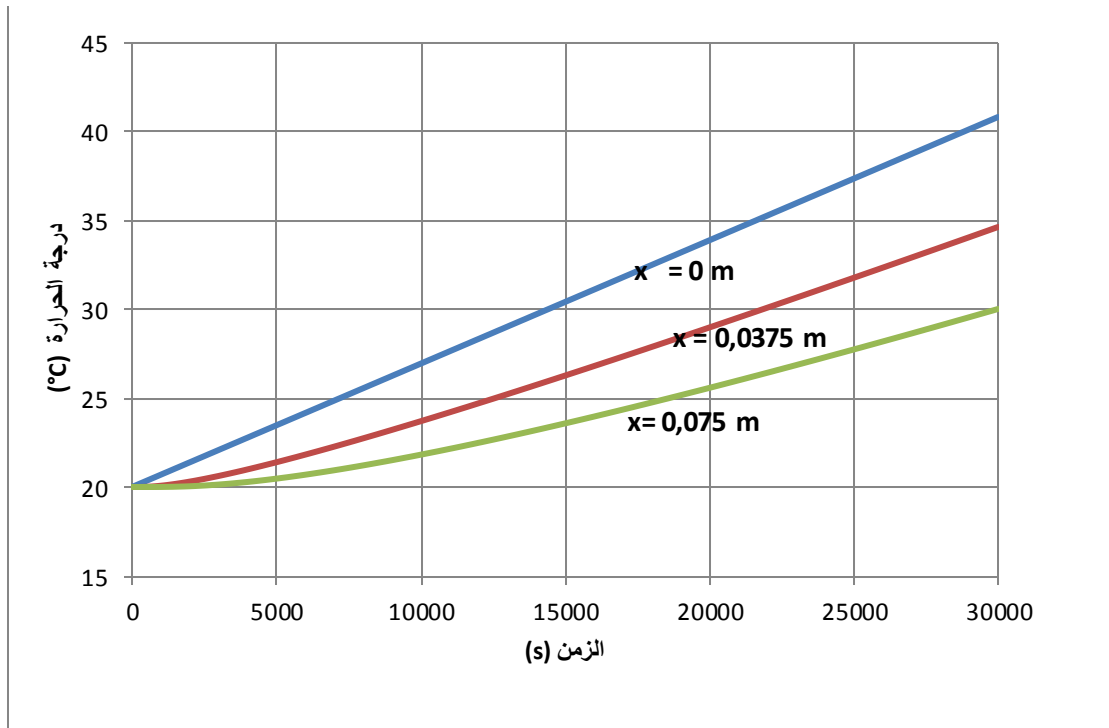
$$T(x,t) = b \left[ \left( t + \frac{x^2}{2a} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - x \left( \frac{t}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{x^2}{4at} \right) \right] + T_0 \quad (13)$$

إعطاء مثال، قمنا باختيار معطيات البحث المنجز من قبل Karim et al [3] والذي تم به اعتبار تغير خطي لدرجة حرارة مفروضة على سطح بلوكة من الببتون من أجل محاكاة التدفئة باستخدام الطاقة الشمسية، حيث إن ميل منحني تغير درجة الحرارة يساوي  $b=6,94 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ، وسماكة البلوكة تساوي  $0,0375 \text{ m}$ ، كما أنّ البلوكة تحوي على بوليميرات مكونة من البارافين كمادة متغيرة الطور حرارتها الكامنة  $\Delta h_s = 110 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  ونفاذيتها الحرارية بالطور السائل  $\alpha = 9.2308 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . يوضح الجدول (1) خواص كلّ من الببتون والمادة متغيرة الطور. وفيما يلي من الدراسة سنقترح أنّ الجسم الصلب عبارة عن جسم شبه . لانتهائي، وسنعطي النتائج من أجل عمق قدره  $x = 0,0375 \text{ m}$ ، وهو ما يوافق سماكة البلوكة المعتبرة.

الجدول 1: خواص الببتون والمادة متغيرة الطور المدروستين [3].

المادة	الكثافة [kg.m <sup>-3</sup> ]	الإيصالية الحرارية [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	السعة الحرارية النوعية [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
PCM T < 27 °C	850	0,28	2800
PCM T > 27 °C	780	0,18	2500
ببتون	2 127	1,00	918

يبين الشكل (1) تغيير درجة الحرارة على كل من سطح الجسم الصلب المصنوع من الببتون، وعلى عمق قدره 0,0375m من السطح، وعلى عمق 0,075 m. نستطيع أن نلاحظ من أجل مدة أطول من ثلاث ساعات (10800 s) بأنه يمكن عد تغيير درجة الحرارة عند  $x=0,0375m$  خطياً. ونلاحظ أنه يتم بلوغ درجة الحرارة  $30^{\circ}C$  عند سطح الجسم الصلب ( $x=0$  m) عندما يصبح الزمن مساوياً 14400 s، بينما يلزم 21700 s ليتم بلوغها عند  $x = 0,0375$  m. إذاً يوجد فارق زمني بين الحالتين قدره 7300 s (أي تقريباً ساعتين) حتى يتم بلوغ درجة الحرارة  $30^{\circ}C$  على سطح الجسم أو عند المسافة المدروسة. كما يتم عند العمق 0,0375 m بلوغ درجة حرارة قدرها  $27^{\circ}C$  عند  $t=16400$  s. ومن أجل  $x=0,075$  m، فإنه يتم بلوغ درجة الحرارة  $30^{\circ}C$  عند  $t=30000$  s وذلك بتأخر قدره 15600 s (أي 4,33 h) مقارنة مع السطح. ويمكن عند نفس العمق الحصول على درجة حرارة قدرها  $27^{\circ}C$  بعد 23400 s.



الشكل 1: تغيرات درجة الحرارة على السطح وعلى عمق قدره  $x=0,0375m$  و  $x=0,075m$  من الجسم الصلب نصف اللانهائي.

### تغير التدفق الحراري

يمكن حساب التدفق الحراري في أي نقطة من الجسم الصلب بواسطة العلاقة:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (14)$$

وبمعرفة أنه:  $erf(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-X^2} dX$  و  $erfc(u) = 1 - erf(u)$  حيث  $u = \frac{x}{2\sqrt{at}}$  وبالتالي

فإن:

$$\frac{\partial \left( erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right)}{\partial x} = -\frac{1}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad \text{و} \quad \frac{\partial \left( erf\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right)}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}}$$

ويصبح التدفق الحراري:

$$\dot{q}(x, t) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda b \left\{ \frac{2x}{2a} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) + \left( t + \frac{x^2}{2a} \right) \frac{-1}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}} - \left( \frac{t}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ e^{-\frac{x^2}{4at}} \left( 1 + x \cdot \frac{2x}{4at} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

عند  $x=0$  يكون التدفق الحراري:

$$\dot{q}(0, t) = \lambda b \left( \frac{t}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

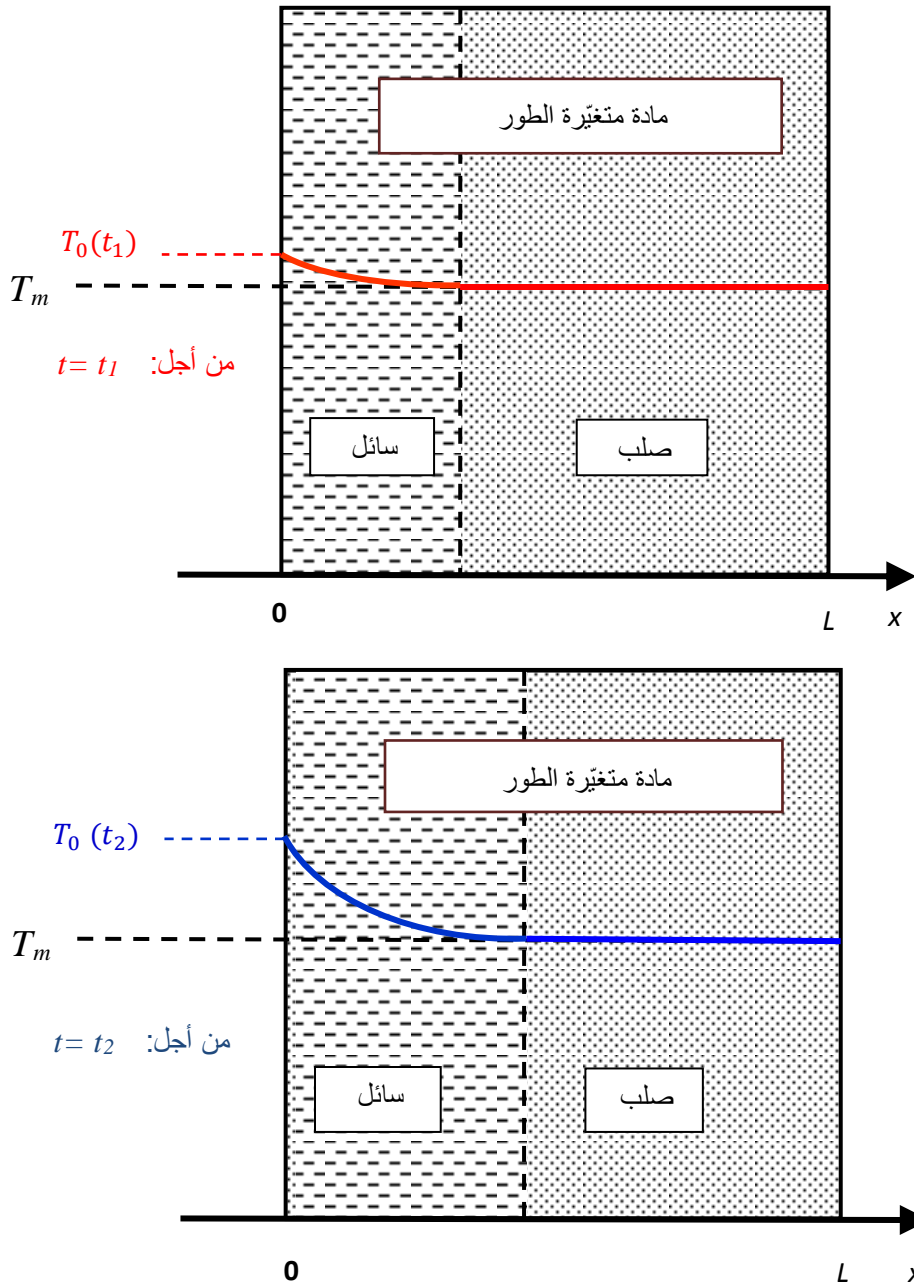
يبين الشكل (2) تغيّر درجة الحرارة من أجل  $x=0$  m و  $x=0,0375$  m.



الشكل 2: تغيّر كثافة التدفق الحراري تبعاً للزمن من أجل تغيّر خطي لدرجة حرارة السطح.

تقدير مقدار التأخر الزمني بين درجة الحرارة على السطح ودرجة الحرارة عند عمق معيّن من جدار يحوي PCM كما هو موضح في الفقرة السابقة ومبيّن على الشكل (1)، فلقد وجدنا أنّ درجة الحرارة تتأخر حتى تبلغ  $30^\circ\text{C}$  عند عمق  $0,0375$  m بمقدار  $7200$  s مقارنة مع السطح. الهدف هو زيادة زمن التأخر من خلال استخدام مادة متغيّرة الطور داخل الجدار. يكون تزايد درجة الحرارة عند الشروط الحدية بطيئاً جداً، ونعتبر أنّ العملية شبه مستقرة، على الرغم من أن درجات الحرارة تتغيّر أيضاً مع الزمن في الطور السائل للمادة. نفترض أنّ زمن انصهار المادة متغيّرة الطور يمثل التأخر الزمني اللازم حتى يتمّ الوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة عند عمق محدد. ويكون هذا الزمن عبارة عن الزمن اللازم من أجل أن ينتقل السطح الفاصل (صلب/سائل) من سطح المادة متغيّرة الطور (أي من  $x=0$  m كما هو موضح على الشكل 3) حتى  $x=L$  والتي تمثل سماكة المادة متغيّرة الطور).

من أجل السماح للانصهار بالحدوث، نفرض أنّ درجة حرارة السطح الابتدائية مساوية أو أكبر من درجة حرارة الانصهار  $T_m$ . (سنرمز لدرجة حرارة السطح بـ  $T_0$ ).



الشكل 3: رسم تخطيطي لتغير درجة الحرارة داخل جدار يحتوي مادة متغيرة الطور، وتغير درجة الحرارة على السطح.

بما أنّ الجسم نصف لانتهائي ودرجة حرارته متجانسة  $T_m$ ، فإنّ الحلّ الكلاسيكي الذي يعطي توزيع درجة الحرارة

هو [4]:

$$\frac{T(x,t)-T_0}{T_m-T_0} = \frac{\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2(\alpha_l t)^{1/2}}\right]}{\operatorname{erf}(\eta_0)} = \frac{\operatorname{erf}(\eta)}{\operatorname{erf}(\eta_0)} \quad (17)$$

حيث:

$$\eta = \frac{x}{2(\alpha_l t)^{1/2}} \quad (18)$$



يتم الحصول على الثابت  $\eta_0$  من معادلة الطاقة على السطح الفاصل.

$$\eta_0 e^{\eta_0^2} \operatorname{erf}(\eta_0) = \frac{c_{p,l}(T_0 - T_m)}{\pi^{1/2} (\Delta h_{s,l})} = \frac{Ste_l}{\pi^{1/2}} \quad (19)$$

حيث:  $Ste_l$  رقم ستيفان، وهو عبارة عن النسبة بين الحرارة المحسوسة للسائل إلى الحرارة الكامنة للانصهار ويساوي:

$$Ste_l = \frac{c_{p,l}(T_0 - T_m)}{\Delta h_{s,l}}$$

موقع بداية الانصهار  $\delta$  وسرعتها  $u_F$  يتعلقان بالسرعة، حيث:

$$\delta(t) = 2 \eta_0 (\alpha_l t)^{1/2} \quad (20)$$

$$u_F = \frac{d\delta}{dt} = \frac{(\alpha_l)^{1/2} \eta_0}{t^{1/2}} \quad (21)$$

البارامتر  $\eta_0$  هو حل للمعادلة الضمنية ويتعلق برقم ستيفان  $Ste_l$ . يجب أن نعبر عن  $\eta_0$  وفق الشكل  $\eta_0 = f(Ste_l)$  وبما أن ذلك غير ممكن بشكل مباشر فإننا سنقوم بتغيير قيمة كل من  $Ste_l$  و  $\eta_0$  بنفس الوقت فنحصل على الجدول (2)، والذي نستطيع منه أن نستخلص العلاقة التي تعبر عن المنحني الذي يمثل  $\eta_0$  من أجل  $0 < Ste < 18$  وهو المجال الذي يهمننا بدراستنا كما يلي:

$$\eta_0 = 0.55 Ste^{0.37} - 0.008 Ste \quad (22)$$

الجدول 2: تغيير قيمة  $\eta_0$  تبعاً لتغيير قيمة  $Ste_l$ .

$Ste$	$\eta_0$	$Ste$	$\eta_0$	$Ste$	$\eta_0$
0	0	1,59520779	0,7395	3,5449062	0,9612
0,17724531	0,2895	1,7724531	0,7678	4,43113276	1,0251
0,35449062	0,399	1,94969841	0,7936	5,31735931	1,0773
0,53173593	0,4774	2,12694372	0,8175	6,20358586	1,1215
0,70898124	0,5394	2,30418903	0,8397	7,08981241	1,1596
0,88622655	0,591	2,48143434	0,8603	8,86226551	1,2229
1,06347186	0,6352	2,65867965	0,8797	10,6347186	1,2742
1,24071717	0,674	2,83592496	0,8978	17,724531	1,4149
1,41796248	0,7085	3,01317027	0,915		
3,19041558	0,9312	3,36766089	0,9466		

بما أن رقم ستيفان يتعلق بالفرق  $(T_0 - T_m)$  وبالتالي بالزمن لأن  $T_0$  تتعلّق بالزمن، فإنّ تغيير  $\eta_0$  يكون تابعاً للزمن. وبما أنّ  $\delta$  تتعلّق بـ  $\eta_0$  فإنّه نحصل على علاقة  $\delta$  كتابع للزمن.

في مقارنة أولى، سنعد أنّ الفرق  $(T_0 - T_m)$  عبارة عن تغيير خطي تابع للزمن:

$$T_0 - T_m = c_1 t + c_2$$

عندئذ، يمكن كتابة رقم ستيفان كما يلي:

$$Ste = \frac{c_{p,l}}{\Delta h_{s,l}} (c_1 t + c_2) = k_1 t + k_2 \quad (23)$$

بافتراض وجود تعاقب من عدة حالات مستقرة، فإنّه نستطيع تحديد الزمن اللازم حتى تصل بداية الانصهار إلى العمق بواسطة:

$$\delta = 2 [0.55 (k_1 t + k_2)^{0.37} - 0.008 (k_1 t + k_2)] (\alpha_1 t)^{1/2} \quad (24)$$

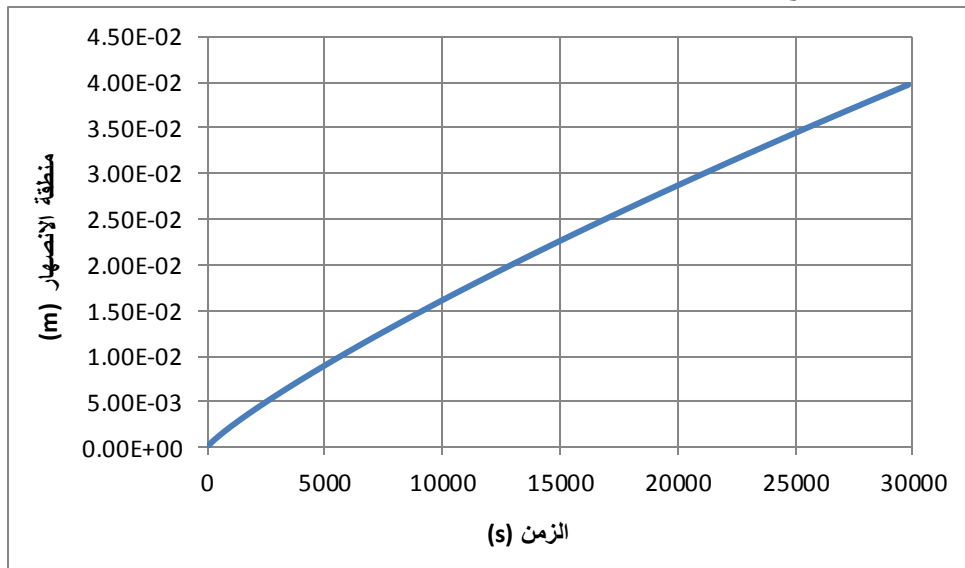
بأخذ بارامترات الطور السائل للمادة متغيرة الطور من الجدول 1 وبالأخذ بعين الاعتبار نفاذيتها الحرارية ( $\alpha_1 = 9,2308 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) وحرارتها الكامنة ( $\Delta h_{fs} = 110 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )، وإذا كان التغير الخطي مشابه لما هو عليه في الفقرة السابقة، فإنه يكون لدينا:

$$T_0 - T_m = 6,94 \cdot 10^{-4} t \quad (25)$$

و:

$$k_2 = 0 \text{ و } k_1 = 1,57727 \cdot 10^{-5}$$

يظهر الشكل 4 تطور المنطقة المنصهرة تبعاً للزمن. فحتى ينصهر الطور الصلب عند عمق قدره  $x=0,0375 \text{ m}$  يحتاج إلى  $27800 \text{ s}$ .



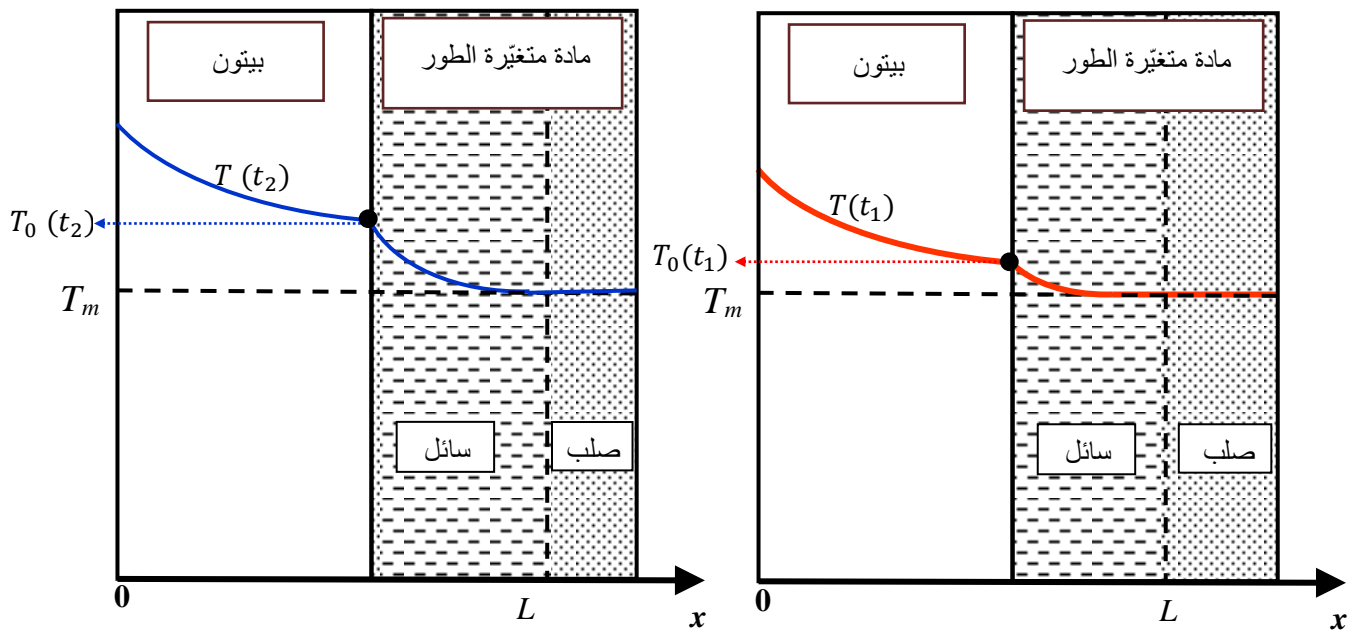
الشكل 4: تطور المنطقة المنصهرة كتابع للزمن.

#### جدار مصنوع من مادة صلبة على تماس مع مادة متغيرة الطور

سنعد الآن أن جزءاً من الجدار مكوّن من الببتون والجزء الآخر مكوّن من مادة متغيرة الطور. تكون تغيرات درجة الحرارة على السطح وعلى السطح الفاصل صلب/PCM عبارة عن تغيرات خطية مع الزمن ولكن بميول مختلفة وذلك كما في الحسابات السابقة. نستطيع بمقاربات بسيطة جداً إضافة قيم الزمن اللازم حتى تتغير درجات الحرارة من  $20^\circ\text{C}$  إلى  $27^\circ\text{C}$  على السطح الفاصل بين الببتون والمادة متغيرة الطور والقيمة التي حصلنا عليها من أجل انصهار كامل.

لقد وجدنا سابقاً بأن درجة الحرارة على مسافة  $x=0,0375 \text{ m}$  كانت تساوي  $27^\circ\text{C}$  من أجل زمن قدره  $t = 13200 \text{ s}$  ( $3,7 \text{ h}$ ) وأن انصهار الـ PCM يحتاج  $2700 \text{ s}$ . ونستطيع أن نلاحظ أن درجة الحرارة على السطح الخلفي للجدار تكون مساوية أو أقل من  $27^\circ\text{C}$  خلال زمن قدره  $41000 \text{ s}$ . بينما لو كان الجدار مصنوعاً من الببتون لاحتاج إلى زمن قدره  $23400 \text{ s}$  حتى تبلغ درجة حرارة سطحه الخلفي  $27^\circ\text{C}$ . أي أنه عندما تكون درجة

الحرارة الابتدائية للجدار  $20^{\circ}\text{C}$ ، فإنه يلزم  $17600\text{ s}$  ( $4,9\text{ h}$ ) إضافية حتى تصبح درجة حرارة السطح الخلفي للجدار مساوية لـ  $27^{\circ}\text{C}$  فيما لو كان الجدار مصنوعاً من المادة متغيرة الطور مقارنة مع الجدار المصنوع من الببتون. يوضح الشكل 5 رسماً تخطيطياً لتغير درجة الحرارة داخل الجدار المصنوع من الببتون في جزء منه بينما الجزء الآخر مكون من المادة متغيرة الطور، حيث تكون درجة حرارة الجدار البدائية (في اللحظة  $t=0$ ) هي درجة حرارة الانصهار  $T_m$ . عند الزمن  $t_1$  يكون جزءاً من الـ PCM قد انصهر وموجود بالطور السائل وتكون درجة حرارة السطح الفاصل بين PCM/ببتون هي  $T_0(t_1)$  ومن ثم تتناقص في الببتون وتتابع تناقصها في الطور السائل للـ PCM حتى تصل إلى الطور الصلب. عند الحدّ الفاصل بين الطورين السائل والصلب يوجد تغير بالطور. يحدث نفس الشيء من أجل الزمن  $t_2$  غير أنّ الكمية المنصهرة من المادة متغيرة الطور تكون أكبر.



الشكل 5: شكل تخطيطي لتغير درجة الحرارة داخل جدار جزء منه مصنوع من الببتون والجزء الآخر يحوي PCM (الجزئين لهما نفس السماكة)، وأيضاً تغير درجة الحرارة على السطح.

### الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا في هذا البحث بدراسة تحليلية من أجل وضع تصور لكيفية تغير درجة الحرارة داخل جدار يحتوي على مادة متغيرة الطور ودرجة حرارة سطحه الخارجي تتغير بشكل خطي، وبالتالي تعيين الزمن اللازم حتى تبلغ درجة حرارة السطح الخلفي للجدار قيمة معينة. هذه المقاربة نوعية لكنها المرة الأولى التي يتم بها حلّ معادلة انتقال الحرارة مع اعتبار تغير خطي لدرجة الحرارة كشرط حدية.

اعتبرنا أنّ الجدار عبارة عن جسم شبه - لانهاضي، وقمنا بالدراسة من أجل عمق قدره  $x = 0,0375\text{ m}$  (وهو ما يوافق سماكة البلوكة المعتبرة)، والذي يمثل السطح الخلفي. حيث وجدنا أنه عندما يكون الجدار مصنوعاً من الببتون فقط ودرجة حرارته الابتدائية  $20^{\circ}\text{C}$  فإنه يلزم زمناً قدره  $23400\text{ s}$  لتصبح درجة حرارة سطحه الخلفي  $27^{\circ}\text{C}$ ،

بينما يلزم زمناً قدره 41000 s أي 4,9 h إضافية عند إضافة المادة متغيرة الطور إلى الجدار. إذا يتم بإضافة المادة متغيرة الطور إلى بنىة الجدار توفير زمن مهم حتى تبلغ درجة حرارة السطح الخلفي قيمة مرتفعة. يساعد دمج المواد متغيرة الطور مع مواد البناء في الحفاظ على درجة حرارة الجدار الداخلي عند قيمة قريبة من درجة حرارة تغيّر الطور. كما أنه من الهام معرفة درجة حرارة السطح الخلفي للجدار عندما يسخن وتصبح درجة حرارته مساوية لدرجة حرارة السطح الأمامي؛ حيث تتغير درجة حرارة السطح الأمامي خلال اليوم. يمكن للأنظمة السليبية أن تكون حلاً ليس فقط لمشكلة التخزين الحراري ولكن أيضاً من أجل تحقيق الشعور بالارتياح الحراري. كما أن موجات الحرارة الحارة التي بدأت تحصل مؤخراً خلال أوقات مختلفة من فصول الصيف؛ في المناطق ذات المناخ المعتدل؛ يجب أن تحث مهندسي العمارة والتصميم وأيضاً المستخدمين على الأخذ بعين الاعتبار مختلف الإمكانيات التي تسمح بتخفيض ذروة درجات الحرارة، وذلك من أجل ضمان الحد الأدنى من الارتياح الحراري حتى في حال غياب مكيفات الهواء.

إنه من الضروري متابعة إجراء الدراسة على هياكل متنوعة للجدار تختلف عن بعضها من ناحية دمج المواد متغيرة الطور مع مواد بناء الجدار، وأيضاً عند إضافة مواد عازلة أو مواد فائقة العزل. وكذلك إضافة مقارنة نتائج الدراسة التحليلية مع نتائج الدراسة الرقمية التي سيتم إجراؤها باستخدام البرنامج الرياضي COMSOL.

### المراجع:

- [1] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, Energy and Buildings, 59 (2013) 82 – 103.
- [2] Khalifa, A. N., Abbas, E.F., A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating, Energy and Buildings, 41 (2009) 407 – 415.
- [3] Karim, L., Barbeon, F., Gegout, P., Bontemps, A., Royon, L., New phase-change material for thermal management of light weight envelope of buildings, Energy & Buildings, 68(2014)703-706.
- [4] Kaviany, M., in Principles of heat transfer, J. Wiley & sons, Inc., N.Y., USA, (2002).